Protokół

z przebiegu publicznej obrony rozprawy doktorskiej w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna pt. *Zastosowanie metod uczenia ze wzmocnieniem do sterowania robotem przemysłowym współpracującym z człowiekiem* mgra inż. Tymoteusza Lindnera w Poznaniu, w dniu 1 marca 2023 roku

Posiedzenie otworzył przewodniczący Komisji Doktorskiej prof. dr hab. inż. **Stanisław Legutko**, który powitał promotora pracy prof. dra hab. inż. **Andrzeja Mileckiego**, recenzentów:

- prof. dra hab. inż. **Krzysztofa Kalińskiego** z Politechniki Gdańskiej,
- prof. dra hab. inż. **Mirosława Pajora** z Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie,
- dra hab. inż. **Piotra Wosia**, prof. PŚk z Politechniki Świętokrzyskiej,

członków Komisji Doktorskiej powołanych w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora:

- dra hab. inż. **Olafa Ciszaka**, prof. PP,
- dra hab. inż. **Andrzeja Gessnera**,
- dra hab. inż. **Bartosza Gapińskiego**, prof. PP,
- dra hab. inż. **Filipa Górskiego**, prof. PP,
- dra hab. inż. **Piotra Paczosa**, prof. PP,
- dra hab. inż. **Rafała Talara**,

sekretarza mgra inż. **Daniela Wyrwała**, doktoranta mgra inż. **Tymoteusza Lindnera** oraz wszystkich zgromadzonych gości, w tym rodzinę doktoranta.

Przewodniczący Komisji Doktorskiej prof. dr hab. inż. **Stanisław Legutko** przedstawił informacje dotyczące przebiegu procedury postępowania w sprawie nadania stopnia naukowego doktora mgr. inż. **Tymoteuszowi Linderowi**:

- otwarcie postępowania w sprawie nadania stopnia naukowego doktora nastąpiło na posiedzeniu Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna dnia 26.04.2021 roku,
- przyjęcie pracy podjęte uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna z dnia 25.01.2023 roku.

Prof. dr hab. inż. **Stanisław Legutko** nadmienił również, że doktorant zdał egzaminy doktorskie:

- z języka obcego nowożytnego - język angielski.

Następnie sekretarz mgr inż. **Daniel Wyrwał** przedstawił sylwetkę doktoranta mgra inż. **Tymoteusz Lindnera**. W ramach pracy naukowej od 2017 doktorant zajmował się zastosowaniem metod sztucznej inteligencji, uczenia maszynowego oraz uczenia głębokiego w robotyce. Szczególny nacisk został położony na projektowanie i implementację autonomicznych systemów sterowania w ramionach robotów i robotach mobilnych oraz zastosowaniu wizji maszynowej. Wyniki jego prac były publikowane w latach 2016-2022 w punktowanych i czasopismach z IF, takich jak: *International Journal of Control, Automation and Systems* czy *Applied Sciences*. Do chwili obecnej jest autorem lub współautorem 16 publikacji, z których trzy są związane z tematyką rozprawy

doktorskiej. Uczestniczył dotychczas w pracach badawczych w ramach 8 projektów naukowo-badawczych, prowadzonych między innymi w Zakładzie Urządzeń Mechatronicznych. Brał również udział w 5 międzynarodowych konferencjach naukowych.

W dalszej części posiedzenia przewodniczący udzielił głosu doktorantowi, prosząc go o zaprezentowanie głównych tez rozprawy doktorskiej.

Po wystąpienia doktoranta przewodniczący udzielił głosu promotorowi prof. dr. hab. inż. **Andrzejowi Mileckiemu**. Zdaniem promotora, opracowana przez mgra inż. **Tymoteusza Lindnera** rozprawa spełnia warunki stawiane pracom doktorskim, ponieważ:

- zawiera wyczerpujący przegląd literatury (około 130 pozycji) dotyczącej postawionego problemu,
- jest samodzielnym rozwiązaniem problemu naukowego, jakim było opracowanie sterowania robotem przemysłowym wykorzystującym algorytmy uczenia ze wzmocnieniem do bezpiecznej współpracy robota i człowieka we wspólnej strefie roboczej,
- spełniono założone cele takie, jak:
  - opracowanie środowiska symulacyjnego oraz modelu kinematyki manipulatora antropomorficznego stosowanego w badaniach doświadczalnych.
  - opracowanie modelu sterowania robotem w środowisku symulacyjnym z wykorzystaniem kinematyki odwrotnej uwzględniającego parametry mechaniczne i dynamiczne robota oraz opracowanie algorytmów sterujących rzeczywistym robotem.
  - opracowanie systemu wykrywania przeszkód.
  - dostosowanie i implementacja wybranych algorytmów uczenia ze wzmocnieniem i ich badania w pozycjonowaniu TCP rzeczywistego robota.
  - opracowanie systemu sterującego pracą robota przemysłowego, pozwalającego na omijanie przeszkód znajdujących się w polu roboczym.
  - adaptacja wytrenowanych w środowisku symulacyjnym algorytmów uczenia ze wzmocnieniem do omijania przeszkód na zadanej trajektorii ruchu.
  - opracowanie systemu sterującego pracą robota przemysłowego pozwalającego na jednoczesną pracę człowieka i robota we wspólnej strefie roboczej.

Promotor pracy dodatkowo dodał, że zastosowane algorytmy uczenia ze wzmocnieniem są relatywnie nowe i wykorzystują zaawansowaną matematykę. Zapoznanie się z nimi i to, w jaki sposób działają oraz zastosowanie ich do sterowania rzeczywistym robotem przemysłowym jest dodatkowym atutem i było wyzwaniem, jakiemu podołał doktorant. Zastosowanie tego typu algorytmów było znaczącym wkładem w rozwój metod sterowania robotami, ponieważ zastępuje się ręczne programowanie robotów na rzecz ich uczenia. Dodatkowo doktorantowi udało się opracować system, który bezpiecznie współpracuje w jednej strefie roboczej z człowiekiem, co zostało wykazane przeprowadzeniem setek udanych prób.

Następnie przewodniczący Komisji Doktorskiej poprosił prof. dra hab. inż. **Krzysztofa Kalińskiego** o odczytanie recenzji pracy. Według recenzenta praca posiada walory poznawcze i utylitarne, a jej teza została udowodniona. Opracowany w ramach pracy system bazujący na metodach uczenia ze wzmocnieniem jest oryginalny i jest rozwiązaniem rzadko spotykanym w literaturze światowej. Recenzent stwierdził, że praca była rozbudowana, a liczba zrealizowanych celów i jej zakres znacznie wykracza poza typowy zakres prac doktorskich. Recenzent odczytał uwagi oraz pytania, do których doktorant miał się ustosunkować. Recenzent stwierdził, że oceniana praca mgra inż. **Tymoteusza Lindnera** spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Praca stanowi, w myśl art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r. Nr 65, poz. 595 z późn. zmianami) oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, jak również - dokumentuje wiedzę teoretyczną kandydata oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego pracy naukowej.

W dalszej kolejności przewodniczący Komisji Doktorskiej poprosił prof. dra hab. inż. **Mirosława Pajora** o odczytanie recenzji pracy. Recenzent stwierdził, że praca mieści się w kontekście popularnej idei przemysłu 4.0. Praca nakreśla rozwiązanie, które pozwala na wykrywanie człowieka w strefie roboczej oraz proponuje system sterowania robotem, który umożliwia bezkolizyjne ominięcie człowieka. Według recenzenta teza i cele pracy są adekwatne, nie budzą zastrzeżeń, a sama teza została udowodniona szeregiem badań doświadczalnych. Praca zawiera wartościowe i oryginalne rozwiązania w zakresie algorytmów autonomicznego sterowania robotów w warunkach ciągłej współpracy z człowiekiem, bazujących na algorytmach sztucznej inteligencji z procedurą uczenia ze wzmocnieniem. Recenzent stwierdził, że autor ma rozległą wiedzę w zakresie teorii uczenia maszynowego i programowania systemów informatycznych. Praca ma silny pierwiastek informatyczny zaadoptowany na grunt inżynierii mechanicznej. Autor ma świadomość zachodzących przemian w obszarze techniki sterowania maszynami, robotami i biegle porusza się w tym zagadnieniach. Praca wpisuje się w najnowsze trendy badawcze w tym obszarze. Recenzent odczytał uwagi oraz pytania, do których doktorant miał się publicznie ustosunkować. Recenzent bardzo wysoko ocenił innowacyjność oraz poziom pracy i wnioskował o jej wyróżnienie. Recenzent stwierdził, że praca spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim.

Następnie przewodniczący Komisji Doktorskiej poprosił dra hab. inż. **Piotra Wosia** o odczytanie recenzji pracy. Recenzent stwierdził, że temat i rozwiązanie przedstawione w pracy jest nowoczesne i potrzebne. Recenzent zaznaczył, że praca jest obszerna, ale bardzo dobrze ustrukturyzowana. Temat rozprawy, jak i zakres prac opisany w rozprawie został określony właściwie. Oceniana praca ma charakter interdyscyplinarny i obejmuje mechatronikę, robotykę, informatykę i mechanikę. Synteza rozwiązań, wiedzy i praktycznych doświadczeń doktoranta umożliwiła osiągnięcie celów pracy oraz potwierdzenie jej tezy. Recenzent podkreślił, że zakres prac i badań był bardzo rozbudowany, a doktorant przeprowadził dużo badań symulacyjnych i przede wszystkim doświadczalnych. Zakres pracy znacznie wykraczał poza typowy zakres pracy doktorskich. Recenzent wnioskował o jej wyróżnienie. Recenzent odczytał uwagi oraz pytania, podkreślił kwestię bezpieczeństwa oraz prędkości ruchu robota w trakcie badań doświadczalnych. Recenzent stwierdził, że praca spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim.

Promotor pracy prof. dr hab. inż. **Andrzej Milecki** poprosił przewodniczącego Komisji Doktorskiej o zabranie głosu w sprawie prędkości ruchu robota w trakcie badań doświadczalnych, która została ograniczona do wartości $25\frac{mm}{s}$. Promotor wymagał od doktoranta ograniczenia prędkości z uwagi na bezpieczeństwo w trakcie, zdaniem promotora, pionierskich i niebezpiecznych badań.

W kolejnej części obrony doktorskiej doktorant został poproszony o ustosunkowanie się do uwag i pytań zadanych przez recenzentów. W pierwszej kolejności doktorant odpowiadał na pytania i uwagi prof. dra hab. inż. **Krzysztofa Kalińskiego.**

Odpowiedź na uwagę numer 2.4.1.1 z treści recenzji prof. dra hab. inż. **Krzysztofa Kalińskiego**, która dotyczyła czasów trenowania algorytmów oraz dodatkowych wyjaśnień dotyczący wartości progowej przedstawionej w pracy.

Doktorant mgr inż. **Tymoteusz Lindner** odpowiedział:

Czasy trenowania jednego agenta dla danego algorytmu w trakcie badań pozycjonowania zostały przedstawione na stronie 63 rozprawy w rozdziale 7.1. Czasy treningu dla poszczególnych algorytmów były następujące:

- DDPG, SAC, TD3 około 4h,
- DDPG+HER, SAC+HER, TD3+HER około 15min.

Należy podkreślić, że był to po prostu czas potrzebny do wykonania $1 \cdot 10^6$ kroków dla DDPG, SAC, TD3 oraz $5 \cdot 10^4$ kroków dla DDPG+HER, SAC+HER, TD3+HER. Po tym czasie algorytm nie musiał się nauczyć wykonywania konkretnego zadania.

Odległość progowa d_{th} była wykorzystywana w funkcji nagrody oraz do określenia momentu zakończenia epizodu, co mogło nastąpić po osiągnięciu maksymalnej liczby kroków lub jeśli TCP robota znajdował się w określonej odległości mniejszej niż d_{th} od pozycji zadanej. Odległość ta była progiem wskazującym, że manipulator przemieścił się w przestrzeni trójwymiarowej do pozycji zadanej z akceptowalną tolerancją, czyli uzyskał sukces. Dodatkowo odległość d_{th} miała duże znaczenie w przypadku trenowania agentów i otrzymywanych przez nich nagród w trakcie treningu. Przykładowo, dla nagrody typu *sparse* algorytm otrzymywał pozytywną nagrodę (wartość 0) tylko w momencie, jeśli TCP robota był w odległości mniejszej niż d_{th} od punktu zadanego.

W trakcie badań testowane były również inne wartości odległości d_{th}. Poza wartościami ±50 mm, ±5 mm i ±0.5 mm testowano również między innymi wartości: ±100 mm, ±25 mm, ±2.5 mm, ±0.1 mm, ±0.05 mm. Co ciekawe dla odległości ±0.1 mm i ±0.05 mm agenci mieli gorszą dokładność pozycjonowania TCP robota, niż dla odległości ±0.5 mm. Wartości odległości d_{th} wybierano w sposób doświadczalny.

Recenzent pracy dr hab. inż. **Piotr Woś**, prof. PŚk poprosił przewodniczącego Komisji Doktorskiej o zabranie głosu w celu zadania dodatkowego pytania doktorantowi, które brzmiało następująco: co się stanie, jeśli przeszkoda umieszczona w polu roboczym robota będzie wykraczała poza jej obrys i robot fizycznie nie będzie w stanie jej ominąć?

Doktorant mgr inż. **Tymoteusz Lindner** odpowiedział:

Agent sterujący pracą robota będzie próbował ominąć przeszkodę, przemieszczając TCP robota, np. wzdłuż przeszkody. Jeśli ruch robota nie jest fizycznie możliwy do wykonania, a przeszkoda nadal znajduje się w bliskim położeniu robota, to wykonywał on ruchy oscylacyjne. Agent tak sterował TCP robota, że odsuwał się on od przeszkody i w kolejnym kroku czasowym na podstawie obserwacji w tym danych z głowicy wykrywającej przeszkody znowu przemieszczał TCP w kierunku przeszkody. Ruch był powtarzany do

zakończenia epizodu. W takim przypadku, żeby uniknąć takiego działania systemu sterowania, można zaimplementować dodatkowy algorytm, który wykrywałby taką sytuację i zatrzymywał pracę robota, dodatkowo informując, że zadana pozycja nie jest możliwa do osiągnięcia.

Odpowiedź na uwagę numer 2.4.1.3 z treści recenzji prof. dra hab. inż. **Krzysztofa Kalińskiego**, która dotyczyła eliminacji nieregularnych skoków podczas realizacji ruchów robota oraz eliminacji uczestnictwa człowieka w zastosowaniach przemysłowych zrobotyzowanych systemach produkcyjnych.

Doktorant mgr inż. **Tymoteusz Lindner** odpowiedział:
Nieregularne ruchy po trójkącie przytoczone to sformułowanie, które odnosiło się do ścieżki ruchu TCP robota wywołanej przez algorytm sterujący zaproponowany w pracy. Taka trajektoria była wynikiem działania zastosowanego algorytmu uczenia ze wzmocnieniem i generowanych przez niego akcji, tj. przemieszczenia TCP robota w przestrzeni trójwymiarowej. Ruchy te występowały, np. w przypadku podążania robota po zadanej trajektorii. Trajektoria ruchu robota przypominała trójkąty, a nie wygładzoną linię. Całkowita eliminacja nieregularnych ruchów może nie być do końca możliwa, ale efekt trójkątnych ruchów można będzie złagodzić. Zastosowanie dodatkowego algorytmu, który analizuje akcje podejmowane przez agenta i w pewien sposób je wygładza, czyli uniemożliwia zbyt dużą zmianę przemieszczania w stosunku do poprzednich położeń TCP, może być dobrym punktem wyjścia do badań nad poprawą nieregularnych ruchów generowanych przez agenta.

Rzeczywiście istnieje obecnie tendencja do eliminacji człowieka z wykonywania niektórych czynności na liniach przemysłowych oraz do bezpośredniej współpracy człowieka z robotami i maszynami. Chociaż taki jest cel wielu prac, to na obecnym stanie techniki, całkowita eliminacja człowieka z linii produkcyjnych nie jest na razie możliwa. Nadal żadne algorytmy oraz systemy sterowania nie mogą prześcignąć człowieka w zdolności do percepcji, rozpoznawania złożonych obiektów i intencji oraz umiejętności podejmowania decyzji dotyczących sterowania w zależności od zmian w otoczeniu. Z tego względu współpraca człowieka z robotami w niektórych przypadkach jest uzasadniona i potrzebna, zwłaszcza że roboty cechują się o wiele większą dokładnością i precyzją działania, niż człowiek. Przedstawiony w pracy system sterowania może być zastosowany do robota pracującego w zakładzie produkcyjnym, ale może być również użyty, np. w robocie humanoidalnym z ramionami, który ma pomagać człowiekowi w pracach domowych lub innych czynnościach, gdzie interakcja między człowiekiem a robotem będzie nieunikniona. Z tego powodu badania nad współpracą robotów z człowiekiem są w pełni uzasadnione.

Odpowiedź na uwagę numer 2.4.2.12 z treści recenzji prof. dra hab. inż. **Krzysztofa Kalińskiego**, która dotyczyła opisu rysunku oraz tekstu w rozprawie.

Doktorant mgr inż. **Tymoteusz Lindner** odpowiedział:
Zdanie w tekście rozprawy na stronie 100 nie zostało dostatecznie dobrze doprecyzowane. Tekst ten dotyczył porównania rysunków 72 i 75, na których przedstawiono trajektorie odpowiednio, w kształcie okręgu i prostokąta oraz zmieniano położenie przeszkody w osi X.

W dalszej kolejności doktorant odpowiadał na pytania i uwagi prof. dra hab. inż. **Mirosława Pajora.**

Odpowiedź na pytanie numer 1 z treści recenzji prof. dra hab. inż. **Mirosława Pajora**, które dotyczyło poziomu złożoności zamodelowania własności dynamicznych robota.

Doktorant mgr inż. **Tymoteusz Lindner** odpowiedział:

W środowisku symulacyjnym *MuJoCo* zdefiniowano strukturę kinematyczną oraz podano parametry elementów składowych modelu takie, jak: masy członów, momenty bezwładności, tłumienie w przegubach itd.

W uproszczeniu, tworzenie modelu w środowisku *MuJoCo* polega na umieszczeniu elementu robota, np. podstawy w określonym miejscu w przestrzeni, sprecyzowaniu jego masy i momentu bezwładności itd. Następnie precyzuje się typ przegubu, np. obrotowe, pomiędzy kolejnym elementem robota, np. ramieniem. Dodatkowo można podać parametry: miejsce zamocowania przegubu, oś obrotu, ograniczenia ruchu, moment bezwładności w przegubie, tłumienie, tarcie. Dla kolejnego elementu w łańcuchu kinematycznym, np. ramię podaje się kolejne parametry związane z miejscem jego zamocowania, masą, momentem bezwładnością, tarciem itd.

Parametry takie jak tłumienia, momenty bezwładności przegubu i tarcia zostały wyznaczone w sposób doświadczalny. Porównanie zostało wykonane w trakcie równoczesnego uruchomienia modelu symulacyjnego robota oraz rzeczywistego robota, zadając w kolejnych krokach takie same przemieszczenia kątowe dla poszczególnych przegubów. W przybliżeniu były to skoki jednostkowe. Po wykonaniu kroku odczytywano pozycję rzeczywistego robota i modelu. Parametry modelu dobierano w taki sposób, żeby różnica pomiędzy pozycją modelu robota, a pozycją rzeczywistego robota była jak najmniejsza. Wartości masy i momentów bezwładności poszczególnych elementów składowych robota zostały zaczerpnięte z dokumentacji.

W środowisku symulacyjnym nie modelowano dokładnie napędów, ale dla poszczególnych przegubów modelu robota podano wyżej wymienione parametry.

Odpowiedź na pytanie numer 2 z treści recenzji prof. dra hab. inż. **Mirosława Pajora**, które dotyczyło różnic w trajektoriach przedstawionych na rysunkach 44 i 49 w rozprawie.

Doktorant mgr inż. **Tymoteusz Lindner** odpowiedział:

W badaniach przedstawionych w rozdziale 7 pracy, celem zaproponowanego systemu sterowania bazującego na algorytmach uczenia ze wzmocnieniem było głównie przemieszczenie TCP robota z punktu początkowego do zadanego. Dla jednej z testowanych funkcji nagród, tj. *dense trajectory* brano również pod uwagę odchylenie od linii prostej utworzonej na bazie punktu początkowego i zadanego. Jednak ta nagroda głównie bazowała na błędzie pozycjonowania. Z tego też względu, dla niektórych wytrenowanych agentów, wygenerowana trajektoria nie była idealną linią prostą.

Różnica pomiędzy kształtami trajektorii uzyskanymi w badaniach symulacyjnych i doświadczalnych jest spowodowana między innymi zastosowanymi funkcjami nagród, pewnym brakiem determinizmu agenta, który sterował robotem oraz tym, że w przypadku symulacji położenia w poszczególnych krokach były wyznaczane z modelu, który nie uwzględniał wszystkich nieliniowości rzeczywistego robota. Stąd występowały drobne różnice między modelem a robotem. Wpływały one na działanie tego samego algorytmu zastosowanego do sterowania modelem i rzeczywistym robotem. Agent podejmował bowiem akcje na podstawie obserwacji, którymi były między innymi: aktualna pozycja i prędkość TCP robota. Ten sam agent zarówno w środowisku symulacyjnym, jak i rzeczywistym, może podejmować trochę inne akcje w kolejnych krokach czasowych. Wystarczy, że wektor obserwacji agenta będzie się minimalnie różnił dla poszczególnych

prób, a może on wygenerować inną akcję. Inne obserwacje, a co za tym idzie inne akcje w trakcie całego epizodu, mogą skutkować zmianą całej trajektorii. Mimo takich samych punktów zadanych i początkowych wyznaczone w kolejnych próbach trajektorie nie będą dokładnie takie same.

Odpowiedź na pytanie numer 5 z treści recenzji prof. dra hab. inż. **Mirosława Pajora**, które dotyczyło dokładności pozycjonowania systemu sterowania, który bazował na algorytmach uczenia ze wzmocnieniem i możliwości jej poprawy.

Doktorant mgr inż. **Tymoteusz Lindner** odpowiedział:

W pracy w rozdziale 10 dotyczącym współpracy robota z człowiekiem został zaproponowany system hybrydowy łączący opracowany w pracy system sterowania oparty o algorytmy uczenia ze wzmocnieniem do pozycjonowania zgrubnego z dokładnością około 10 mm oraz firmowy sterownik robota do pozycjonowania dokładnego. Takie połączenie rozwiązuje problem dokładnego pozycjonowania TCP robota.

Poprawę dokładności pozycjonowania może zapewnić zastosowanie innej funkcji nagrody, niż stosowane w pracy. W przyszłości planuje się podjęcie prac zarówno nad opracowaniem specjalnej funkcji nagrody, jak i nad dalszym dostrojeniem hiperparametrów algorytmów, które mogą polepszyć dokładność pozycjonowania. Badany algorytm DDPG z nagrodą typu *dense* osiągnął średnią dokładność pozycjonowania na poziomie 0.5 mm. Zastosowanie tej funkcji nagrody pozwalało na uzyskanie najlepszej dokładności, jednak kosztem „wykrzywionego" kształtu trajektorii ruchu TCP robota.

W dalszej kolejności przewodniczący Komisji Doktorskiej poprosił doktoranta o odpowiedzi na pytania dra hab. inż. **Piotra Wosia**, prof. PŚk. Recenzent stwierdził, że wszystkie jego pytania i wątpliwości zostały wyjaśnione, przez to nie ma potrzeby odpowiadać na pytania z treści recenzji pracy.

Członek Komisji Doktorskiej dr hab. inż. **Rafał Talar** poprosił przewodniczącego Komisji Doktorskiej o zabranie głosu. Dr hab. inż. Rafał Talar zwrócił uwagę na ograniczenia sprzętowe, z jakimi musiał zmierzyć się doktorant oraz na długi czas odpowiedzi zastosowanych czujników w głowicy wykrywającej przeszkody. Zaproponowany w ramach rozprawy system na potencjał, żeby działać znacznie szybciej w przypadku zastosowania między innymi wydajniejszych czujników. Dr hab. inż. Rafał Talar pochwalił doktoranta za maksymalne wykorzystanie możliwości zastosowanych w pracy czujników oraz za sposób akwizycji danych ich analizę i odszumianie sygnału. Dr hab. inż. Rafał Talar podkreślił, że było to duże osiągnięcie doktoranta.

W dalszej kolejności pytanie zadał dr hab. inż. **Olaf Ciszak**, prof. PP. W przypadku maszyn technologicznych, w tym robotów przemysłowych, określa się między innymi dokładność pozycjonowania i powtarzalność pozycjonowania. W jaki sposób w swoich badaniach dokonywał Pan pomiarów dokładności pozycjonowania?

Doktorant mgr inż. **Tymoteusz Lindner** odpowiedział:

Pomiary dokładności pozycjonowania nie były przeprowadzone z zastosowaniem żadnego dodatkowego urządzenia, które pozwalałoby na pomiar dokładności robota. Przedstawione w pracy dokładności pozycjonowania robota były tak naprawdę dokładnością pozycjonowania samego algorytmu, ponieważ akcją agenta, który sterował robotem, było przemieszczenie TCP robota w przestrzeni trójwymiarowej. Pozycja ta wygenerowana przez algorytm była przesyłana do sterownika robota. Następnie

pobierano dane z robota o jego aktualnej pozycji, które były przeliczane ze struktury kinematycznej.

Po udzieleniu odpowiedzi na wszystkie pytania przewodniczący Komisji Doktorskiej zamknął część jawną i zaprosił członków Komisji na niejawną część posiedzenia. W niejawnej części posiedzenia udział wzięli:

- prof. dr hab. inż. **Stanisław Legutko**,
- dr hab. inż. **Olaf Ciszak**, prof. PP,
- dr hab. inż. **Andrzej Gessner**,
- dr hab. inż. **Bartosz Gapiński**, prof. PP,
- dr hab. inż. **Filip Górski**, prof. PP,
- dr hab. inż. **Piotr Paczos**, prof. PP,
- dr hab. inż. **Rafał Talar**,
- prof. dr hab. inż. **Krzysztof Kaliński**,
- prof. dr hab. inż. **Mirosław Pajor**,
- dr hab. inż. **Piotr Woś**, prof. PŚk,
- prof. dr hab. inż. **Andrzej Milecki.**

Pierwszy głos zabrał prof. dr hab. inż. **Krzysztof Kaliński**. Recenzent stwierdził, że zarówno tekst rozprawy, jak i prezentacja pokazały, że doktorant rozwiązał problem naukowy i jest dobrze przygotowany do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej. Treść rozprawy jest imponująca i wykracza poza standardowy poziom i zakres prac doktorskich. Profesor zauważył, że wygłoszona przez doktoranta prezentacja była bardzo klarowna i zrozumiała, co potwierdza, że kandydat oprócz wykorzystywania zdobytej wiedzy w badaniach, potrafi w sposób umiejętny i przejrzysty przedstawiać wyniki tych badań. Recenzent podtrzymywał stanowisko o nadaniu doktorantowi stopnia naukowego doktora.

Jako kolejny głos zabrał prof. dr hab. inż. **Mirosław Pajor**, który zauważył, że doktorant wypowiadał się w sposób zrozumiały i płynnie odpowiadał na pytania, co sugeruje, że był dobrze przygotowany i znał tematykę. Recenzent stwierdził, że praca porusza nowoczesne zagadnienia i podkreślił jej wysoki poziom oraz wnioskował o jej wyróżnienie oraz nadanie doktorantowi stopnia naukowego doktora.

Następnie głos zabrał dr hab. inż. **Piotr Woś**, prof. PŚk, który stwierdził, że przedstawione i zaproponowane w pracy rozwiązanie jest nowatorskie. Recenzent poruszył aspekt filozoficzny dotyczący zastosowania algorytmów sztucznej inteligencji w robotyce i ogólnie w przemyśle. Następnie pochwalił wykonaną w ramach pracy głowicę do wykrywania przeszkód, w której, mimo iż zostały zastosowane nie najwyższej jakości komponenty, to spełniała ona swoje zadanie dzięki pracy wykonanej przez doktoranta. Recenzent podkreślił, że zastosowanie tego typu algorytmów, mimo że są opisane w literaturze, w robotyce i do sterowania robotami jest unikalne i niełatwe. Recenzent podtrzymał stanowisko o wyróżnieniu pracy oraz nadaniu doktorantowi stopnia naukowego doktora.

Dr hab. inż. **Bartosz Gapiński**, prof. PP podkreślił, że doktorant był dobrze przygotowany i znał tematykę rozprawy oraz jest praktykiem. Profesor zasugerował, że badania wykonane w ramach rozprawy mogą być preludium do wniosku o grant badawczy, dzięki któremu doktorant będzie mógł rozwijać bardziej zaawansowane rozwiązania.

Dr hab. inż. **Piotr Paczos**, prof. PP stwierdził, że doktorant był dobrze przygotowany merytorycznie, co jest skutkiem, wielu godzin spędzonych w laboratorium podczas wykonywania badań. Doktorant śmiało i pewnie dyskutował na tematy i problemy poruszone w trakcie obrony, co zostawia bardzo pozytywne wrażenie.

Dr hab. inż. **Filip Górski**, prof. PP stwierdził, że doktorant zostawił po sobie bardzo pozytywne wrażenie i przygotował bardzo dobrą prezentację, która była ciekawa. Profesor zauważył kilka zastosowań praktycznych zaproponowanego w ramach pracy systemu między innymi w bioinżynierii, w której nie są wymagane duże prędkości robotów tak, jak w przypadku zakładów produkcyjnych. Profesor podkreślił dużą ilość pracy wykonanej przez doktoranta i przeprowadzanie oprócz badań symulacyjnych również badań doświadczalnych, mimo że rozprawa mogłaby się równie dobrze zakończyć tylko na badaniach symulacyjnych. Profesor również zasugerował, że badania wykonane w ramach rozprawy mogą być wstępem do grantu badawczego i szerszych badań, bo temat pracy jest obiecujący.

Dr hab. inż. **Olaf Ciszak**, prof. PP pochwalił doktoranta, że już od początku studiów inżynierskich kandydat był wyróżniającym się studentem, otrzymując różne nagrody i stypendia. Dziekan Wydziału Inżynierii Mechanicznej PP docenił zaangażowanie i ilość pracy włożony przez doktoranta w realizację celu, jakim była rozprawa doktorska oraz podkreślił, że tematyka badań, którą zajmuje się doktorant jest obiecująca i bardzo nowoczesna.

Dr hab. inż. **Andrzej Gessner** stwierdził, że ma pozytywną opinię o pracy i doktorancie. Temat podjęty przez doktoranta jest ważny oraz ciekawy i warto go rozwijać.

Dr hab. inż. **Rafał Talar** zauważył, że z uwagi na zaprezentowane przez doktoranta wyniki badań i nowatorskie rozwiązanie warto inwestować w rozwój kandydata zarówno merytorycznie, jak i finansowo. Kompetencje doktoranta są wystarczające, żeby nadać mu stopień naukowy doktora.

Prof. dr hab. inż. **Stanisław Legutko** stwierdził, że jest pod wrażeniem poziomu wiedzy doktoranta oraz jego prac badawczych. Profesor podkreślił klarowność prezentacji wyników badań oraz tematyki rozprawy i umiejętności doktoranta w dyskusji.

Prof. dr hab. inż. **Andrzej Milecki** pochwalił doktoranta za prezentację wyników, merytoryczną dyskusję oraz postawę w trakcie obrony. Promotor podkreślił ilość pracy włożonej w wykonanie badań i rozpoznanie algorytmów uczenia ze wzmocnieniem do sterowania robotem przemysłowym, które są bardzo skomplikowane matematycznie.

Następnie odbyło się tajne głosowanie nad przyjęciem i zgłoszeniem wniosku do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna o nadanie stopnia naukowego doktora mgr. inż. **Tymoteuszowi Lindnerowi**. Wyniki głosowania były następujące: na 11 osób uprawnionych do głosowania, 11 osób głosowało za wystąpieniem do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna w celu nadania doktorantowi stopnia naukowego doktora.

Z uwagi na regulamin obowiązujący na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej nie można było przyznać wyróżnienia pracy, ponieważ tylko dwie z trzech recenzji zawierały jednoznaczną prośbę o jej wyróżnienie.

Przewodniczący Komisji Doktorskiej zamknął część niejawną obrony rozprawy doktorskiej.

Po zakończeniu tej części obrony przewodniczący prof. dr hab. inż. **Stanisław Legutko** publicznie ogłosił wyniki niejawnego posiedzenia Komisji Doktorskiej i złożył gratulacje mgr. inż. **Tymoteuszowi Lindnerowi**.

Doktorant podziękował promotorowi za nieocenione rady w trakcie prowadzenia badań, recenzentom za wnikliwą ocenę rozprawy, przewodniczącemu oraz członkom Komisji Doktorskiej, rodzinie i rodzicom za wkład w edukację oraz kolegom z Zakładu Urządzeń Mechatronicznych za merytoryczne dyskusje dotyczące rozprawy.

Poznań, 1.03.2023 r.

protokołował mgr inż. Daniel Wyrwał

przewodniczący Komisji Doktorskiej
prof. dr hab. inż. Stanisław Legutko